

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

## **Diplomová práce**

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Porovnání zpevňovacího efektu při obrábění navařeného  
Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625**

*Comparison of Hardening Effect Caused by Cutting of Weld Clad Layer of Inconel 625 and  
Forged Inconel 625*

Student:

Bc. Tomáš Vitásek

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Vitásek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: Porovnání zpevňovacího efektu při obrábění navařeného Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625  
Comparison of Hardening Effect Caused by Cutting of Weld Clad Layer of Inconel 625 and Forged Inconel 625

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor požadavků kladených na strojní součásti z materiálu Inconel 625.
2. Návrh metody pro stanovení zpevňovacího efektu při obrábění tohoto typu materiálu.
3. Provedení praktických zkoušek pro stanovení zpevňovacího efektu.
4. Vyhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro využití v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; CZÁN, A. *Obrábění titánových a niklových zliatin*. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 2001. 195 s. ISBN 80-7100-933-4.  
[2] KONDERLA, R. *Možnosti snižování nákladů při výrobě součástí z těžkoobrobitelných materiálů*. Teze disertační práce. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. 31 s.  
[3] KONDERLA, R.; MRKVICA, I.; JANOŠ, M.; VITÁSEK, T. *Possibilities of the Machining Nickel Alloys*. In Proceedings of 10th International Scientific Conference New Ways in Manufacturing Technologies. Prešov : TU Košice, FVT with seat in Prešove, 17 - 19th June 2010, p. 155-160. ISBN 978-80-553-0041-0.  
[4] NORMY, PROSPEKTY, KATALOGY.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr.Ing. Ivan Mrkvica**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011

  
doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.  
vedoucí katedry

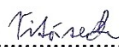


  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5.2011



podpis studenta

### Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 23.5.2011

.....  
Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Tomáš Vitásek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Třešňová 5577, Ostrava – Třebovice, 722 00

### **Poděkování**

Děkuji firmě V-NASS za umožnění zpracování problematiky zpevňovacího efektu při obrábění, který je v této práci řešen.

Zároveň děkuji doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica za vedení při zpracování této diplomové práce.

V Ostravě 23.5.2011.....

.....  


podpis

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VITÁSEK, T. *Porovnání zpevňovacího efektu při obrábění navařeného Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 56 s. Bakalářská práce, vedoucí: doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

Diplomová práce se zabývá porovnáním zpevňujícího efektu při obrábění navařeného Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625.

V první části je proveden rozbor požadavků na materiál Inconel 625. Dále jsou navrženy metody pro porovnání zpevňovacího efektu při obrábění. Následně jsou provedeny praktické zkoušky a vyhodnocení dosažených výsledků. Dokumentace s naměřenými hodnotami je zpracována v příloze diplomové práce. Na závěr je navrženo doporučení pro využití v praxi.

## ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

VITÁSEK, T. *Comparison of Hardening Effect Caused by Cutting of Weld Clad Layer of Inconel 625 and Forged Inconel 625*. Ostrava: Department of Working and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2011, 56 p. Diploma thesis, head: Dr. Ing. Ivan Mrkvica

The Diploma thesis deals with comparison of hardening effect caused by cutting of weld clad layer of Inconel 625 and forged Inconel 625.

In the first part requirements analysis on material Inconel 625 is carried out. Further, methods for comparison of hardening effect caused by cutting are suggested. Subsequently, practical examination and evaluation of achieved results are carried out. Documentation with measured values is processed in the enclosure of the diploma work. Finally, recommendations for practical usage are suggested.

# Obsah diplomové práce

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>3</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Cíle diplomové práce .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Shrnutí bakalářské práce a její praktické využití ve firmě V-NASS .....</b>	<b>6</b>
<b>4 Požadavky kladené na strojní součásti z materiálu INCONEL 625.....</b>	<b>8</b>
4.1 Materiál Inconel.....	9
4.2 Charakteristika materiálu Inconel.....	9
4.2.1 Vlastnosti .....	10
4.2.2 Obrábění .....	10
4.2.3 Svařování .....	10
4.2.4 Nákup a cena .....	11
4.3 Chemické složení materiálu Inconel 625.....	11
<b>5 Příprava pro porovnání rozdílného zpevňovacího efektu při obrábění navařeného Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625 .....</b>	<b>12</b>
5.1 Příprava vzorků .....	12
5.2 Navařování materiálu Inconel 625 .....	12
5.3 Obrábění obrobku .....	14
<b>6 Stanovení rozdílného zpevňovacího efektu při obrábění navařeného Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625.....</b>	<b>17</b>
6.1 Tvrdost.....	18
6.2 Mikrotvrdost .....	19
6.3 Zkouška tvrdosti podle VICKERSE.....	20
6.3.1 Podstata zkoušky .....	20
6.3.2 Vztah výpočtu tvrdosti podle Vickerse .....	22
6.3.3 Zkoušené těleso .....	22
6.3.4 Postup zkoušky .....	22
6.4 Zkouška tvrdosti podle BRINELLA .....	23
6.4.1 Princip metody.....	24
6.4.2 Vztah výpočtu tvrdosti podle Brinella.....	25
6.4.3 Postup zkoušky .....	25
<b>7 Praktické zkoušky měření tvrdosti opracovaných ploch vzorků.....</b>	<b>27</b>



7.1	Měřicí přístroj AMH43-Series pro měření mikrotvrdosti .....	27
7.2	Výsledky naměřených hodnot u vzorků z celoobjemového Inconelu .....	28
7.2.1	Měření tvrdosti povrchu opracované plochy stranovým ubíracím nožem .....	28
7.2.2	Zhodnocení naměřených hodnot .....	31
7.2.3	Měření tvrdosti povrchu opracované plochy upichovacím nožem.....	32
7.2.4	Zhodnocení naměřených hodnot .....	34
7.3	Výsledky naměřených hodnot u vzorků z navařeného Inconelu .....	35
7.3.1	Měření tvrdosti povrchu opracované plochy stranovým ubíracím nožem .....	35
7.3.2	Zhodnocení naměřených hodnot .....	37
7.3.3	Měření tvrdosti povrchu opracované plochy upichovacím nožem.....	38
7.3.4	Zhodnocení naměřených hodnot .....	40
7.4	Výsledky naměřených hodnot tvrdosti obrobených ploch podle Brinella .....	41
7.5	Výsledky měření drsnosti povrchu .....	42
7.5.1	Naměřené hodnoty drsnosti povrchu opracovaných ploch.....	43
<b>8</b>	<b>Vyhodnocení naměřených hodnot.....</b>	<b>46</b>
8.1	Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti povrchu podle Vickerse.....	46
8.1.1	Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti plochy opracované stranovým ubíracím nožem .....	46
8.1.2	Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti plochy opracované upichovacím nožem .....	48
8.2	Shrnutí naměřených hodnot tvrdosti opracovaného povrchu podle Vickerse .....	49
8.3	Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti povrchu podle Brinella .....	49
8.4	Vyhodnocení naměřených hodnot drsnosti ploch .....	49
8.5	Návrh opracovávání Inconelu na základě zjištěných údajů.....	50
<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>51</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>56</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

D	průměr kuličky	[mm]
F	zkušební zatížení	[N]
HB	označení tvrdosti podle Brinellovy stupnice	
HBS	tvrdost podle Brinella za použití kalené ocelové kuličky	
HBW	tvrdost podle Brinella za použití kuličky z tvrdokovu	
HV	označení tvrdosti podle Vickersovy stupnice	
Ra	označení drsnosti	
TIG	svařovací technologie	
VBD	vyměnitelná břitová destička	
d	úhlopříčka vtisku	[mm]
d	aritmetický průměr vtisku	[mm]
h	hloubka vtisku	[mm]
$\alpha$	vrcholový úhel vnikajícího tělesa (jehlan)	

# 1 Úvod

Tato diplomová práce navazuje na získané výsledky v bakalářské práci (Návrh technologie obrábění navařených strojních součástí), která řešila zásadní změnu výrobního postupu (technologie navařování) u součástí z materiálu Inconel.

Během opakované výroby těchto dílů, po dobu cca 1 rok, vyvstal problém s vyšší spotřebou používaných nástrojů. Zároveň stoupla náročnost na dodržení garantované jakosti opracované plochy z důvodů zhoršené obrobitelnosti navařeného Inconelu, v porovnání s Inconelem celokovaným.

Základním cílem bude porovnat rozdílné vlastnosti materiálu Inconel kovaného a navařeného. Stanovit nejvhodnější metody srovnání obou materiálů, provést praktické zkoušky a následně po vyhodnocení těchto zkoušek navrhnout opatření, která povedou k odstranění vzniklého problému a optimalizaci technologického postupu pro obrábění navařeného inconelu ve firmě V-NASS, a.s.

## **2 Cíle diplomové práce**

Cílem této diplomové práce, je zjistit důvod zvýšené spotřeby používaných nástrojů a zvýšení náročnosti dosažení požadované jakosti opracované plochy navařeného Inconelu. Tento jev byl pozorován během několika měsíčního používání navařeného Inconelu namísto dříve používaného kovaného Inconelu. Z toho důvodu je zde předpoklad, že tyto negativní jevy způsobuje mírná rozdílnost mezi těmito polotovary.

Firma V-NASS proto zadala požadavek na přezkoumání tohoto problému, který bude zkoumán na dvou vzorcích. První vzorek bude z kovaného (celoobjemového) Inconelu a druhý z navařeného Inconelu.

Řešení spočívá v provedení několika měření pro zjištění, zda mají opracované plochy rozdílné vlastnosti u jednotlivých vzorků. Opracování bude provedeno pomocí dvou soustružnických nožů, stranového ubíracího a upichovacího. Tyto nože budou použity při opracovávání obou vzorků za použití měnicích se posuvů.

Následně proběhne měření tvrdosti a drsnosti těchto opracovaných ploch pro zjištění, zda jsou vlastnosti opracované plochy rozdílné u jednotlivých vzorků za použití stejných obráběcích parametrů.

### **3 Shrnutí bakalářské práce a její praktické využití ve firmě V-NASS**

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout novou konstrukci výrobku a novou výrobní technologii konkrétní součástky - příruby, využívající se pro technologii k podmořské těžbě ropy. Při tomto způsobu dobývání ropy z mořského dna, se z důvodů extrémních provozních podmínek musí využívat speciální materiály. Jedním z nich je materiál Inconel 625, který má určité specifické vlastnosti vhodné pro využití v mořském prostředí.

Jednou z firem zabývajících se výrobou těchto speciálních dílů je firma V-NASS, pro kterou byl zpracován konkrétní návrh nové technologie. Cílem návrhu bylo zefektivnění a snížení výrobních nákladů pro určitý konkrétní výrobek. Při návrhu se vycházelo z náročné obrobitelnosti a vysoké ceny materiálu Inconel. Dále se musely vzít v úvahu všechny funkční plochy příruby, které jsou vystavovány extrémním podmínkám mořského prostředí.

Součástí návrhu nové technologie byl způsob navařování Inconelu navařovacím drátem na funkční plochy. Protože firma již vlastnila navařovací zařízení, bylo možno úspěšně použít tuto zvolenou technologii. Jako polotovar bylo možno zvolit výrazně levnější materiál třídy 17 150, na který byl Inconel následně navařen.

Pro ověření návrhu nové technologie byly provedeny zkoušky přímo ve výrobě. Zkoušky byly provedeny přesně podle navržených technologických postupů, a tímto se potvrdila možnost výroby touto technologií. Během výroby byly průběžně prováděny kapilární a magnetické zkoušky pro zjištění případných vnitřních vad, které by mohly znemožnit použití příruby pro požadovanou funkci.

Při technicko-ekonomickém zhodnocení se projevilo, že navržená technologie výroby s použitím navařování, bez započtení nákupních cen použitých materiálů, se jeví časově a finančně náročnější. Zahrnul-li se do ceny výrobku nakupovaný polotovar, stala se navržená technologie finančně výhodnější.

Úspora na 10-ti kusech byla 64 800 Kč. Při roční produkci 120-ti kusů byla odhadovaná úspora 777 600,- Kč.

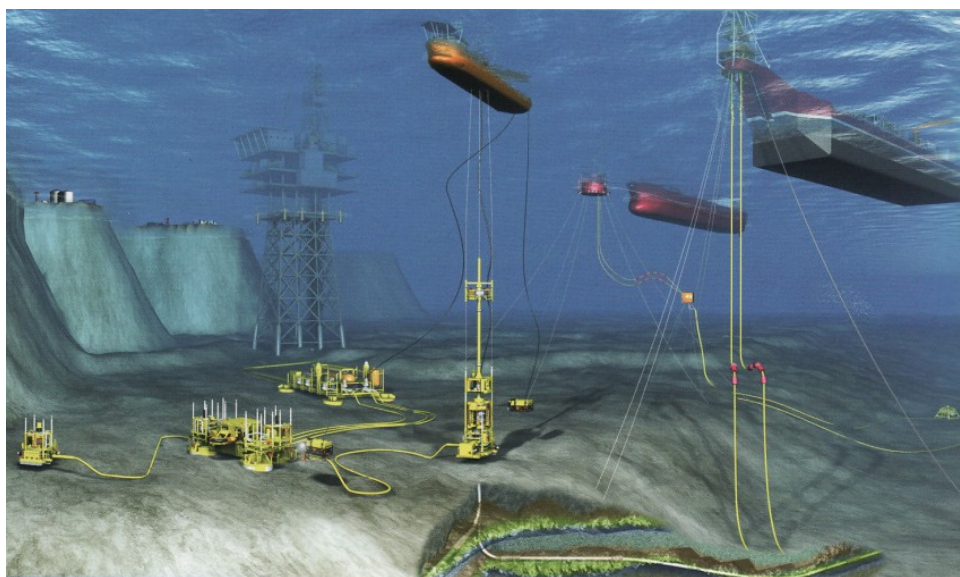
Další nespornou výhodou bylo značné uvolnění finančních prostředků nutných pro nákup potřebných materiálů. Oproti původní potřebě finančních prostředků na nákup polotovarů, se projevila až 80% úspora. Z uvedených důvodů byl nový návrh firmou V-NASS přijat a je dodnes používán[1].

## 4 Požadavky kladené na strojní součásti z materiálu INCONEL

625

Jednou z nejdůležitějších průmyslových surovin je ropa, která se využívá nejen pro energetické účely, ale je i důležitým průmyslovým a farmaceutickým artiklem. Její těžba souvisí s rozvojem vrtné techniky od počátku 19. století. Jako protiváha k tradiční suchozemské těžbě ropy se stává těžba na mořském dně. Technologie dobývání ropy z mořského dna se neustále vyvíjí a díky tomu se vrty mohou provádět ve stále větších hloubkách a tím se mohou posouvat i limity těžby. Se zvětšující se hloubkou se zvyšují technické a technologické požadavky na používané součásti vrtných souprav. Průměrná cena ropného vrtu do hloubky moře 200 metrů je 5 - 8 milionů amerických dolarů, což je desetkrát víc než stojí vrt na pevnině a v podmořské hloubce 1 500 metrů vyjde vrt dokonce až na 50 milionů dolarů. Přesto zůstává podmořská těžba tímto způsobem rentabilní a dnes čerpá ropu z podmořských ložisek více než 40 zemí světa[1].

Hloubka, tlak a přítomnost mořské soli, to jsou velmi extrémní podmínky, které kladou zvýšené požadavky na používaný materiál komponentů těžebních souprav. Jedním z nejvhodnějších materiálů pro použití za extrémních podmínek se stává materiál Inconel, který je pro své příznivé vlastnosti používán právě v mořském prostředí (viz Obr. 4.1).



Obr. 4.1 Podmořská těžba ropy[1]

## 4.1 Materiál Inconel

Název Inconel je vlastní registrovanou ochrannou známkou společnosti Special Metal Corporation, která se zabývá výrobou a distribucí materiálu se speciálními požadavky. Materiál má více obchodních názvů, mezi které patří:

- Inconel 625
- Chronin 625
- Altemp 625
- Haynes 625
- Nickelvac 625
- Nicrofer 6020

## 4.2 Charakteristika materiálu Inconel

Inconel je používán pro svou vysokou pevnost, vynikající strukturu a výbornou odolnost proti korozi, pro celou řadu extrémně namáhaných součástí. Chemické složení Inconelu 625 je uvedeno v tabulkách Tab. 4.1. Pevnost Inconelové slitiny je čerpána ze zpevňovacího účinku molybdenu a niklu. Tyto kombinace prvků jsou také zodpovědné za dobrý odpor proti široké škále korozních prostředí, stejně jako odolnost proti oxidaci. Tato odolnost proti oxidaci a koroznímu prostředí z něj dělá vynikající materiál, ideální pro používání v mořském prostředí. Příkladem použití jsou nejen strojní díly k těžnímu zařízení, ale také ocelové lana pro zakotvení kabelu na mořském dnu, opláštění podmořských kabelů, popř. listy vrtulí pro speciální lodě[1].

Vysoká tažnost, vynikající mez únavy při vyšších teplotách a oxidační odolnost jsou vlastnosti, díky kterým je Inconel také zajímavý pro letecký průmysl. Je například používán na výfukové zařízení motorů, palivové a hydraulické trubky, turbíny.



### **4.2.1 Vlastnosti**

Hlavní vlastností slitiny Inconel je odolnost proti oxidaci a korozi. Díky tomu je vhodný pro použití v extrémních podmínkách. Při zahřátí Inconelu se vytváří silná a stabilní pasivační oxidační vrstva, která chrání povrch materiálu před agresivním prostředím. Inconel si zachovává pevnost v širokém rozsahu teplot, proto se stává atraktivním také pro vysokoteplotní aplikace[1].

### **4.2.2 Obrábění**

Inconel je velmi těžce obrobiteľný. Při opracování třískovým obráběním má materiál tendenci k elastické deformaci a tudíž k intenzivnímu zpevňování. Z tohoto důvodu se Inconel obrábí pomocí nástrojů s VBD s minimálním možným počtem třísek, tak aby se eliminovalo postupné nežádoucí zpevňování povrchu materiálu. Polotovary z Inconelu jsou velmi nehomogenní a v mnoha případech je nutno měnit parametry obrábění téměř při každém kuse, což kromě zvýšených nákladů na opracování zvyšuje také nároky na technickou úroveň obsluhy obráběcích strojů[1].

### **4.2.3 Svařování**

Svařování slitin Inconelu je obtížné vzhledem k náchylnosti k popraskání v tepelně ovlivněných oblastech. Přesto jsou firmy, které tuto technologii svařování a navařování zvládají a dokážou ji aplikovat i pro tak náročnou výrobu jako je výroba dílů pro technologii podmořského dobývání ropy. Nejčastější způsob svařování a navařování Inconelu je pomocí svařovací metody TIG. V posledních letech se začíná využívat také impulsové mikrosvařování laserem[1].

#### 4.2.4 Nákup a cena

Výroba slitiny Inconel, včetně kovaných polotovarů, je velmi náročná a zvládá ji jenom několik firem na světě (USA, Mexiko, Velká Británie, Německo), ale je také chráněná licenčními smlouvami. To vše ovlivňuje nákupní cenu polotovarů, která je mnohonásobně vyšší než běžně dostupné konstrukční ušlechtilé oceli. Termínová dostupnost nakupovaných výkovků je stále velmi zdoluhavá, řádově v několika měsících. To klade zvýšené nároky na finanční potřeby firmy[1].

### 4.3 Chemické složení materiálu Inconel 625

Tab. 4.1 Chemické složení materiálu Inconel 625[6]

Prvek	Obsažená %
Ni	58 min.
Cr	20.0 – 23.0
Fe	5.0 max.
Mo	8.0 – 10.0
Nb	3.15 – 4.15
C	0.10 max.
Mn	0.50 max.
Si	0.50 max.
P	0.015 max.
S	0.015 max.
Al	0.40 max.
Ti	0.40 max.
Co	1.0 max.

## **5 Příprava pro porovnání rozdílného zpevňovacího efektu při obrábění navařeného Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625**

Pro porovnání zpevňujícího efektu při obrábění byly použity dva vzorky, jeden z kovaného Inconelu a druhý z navařeného Inconelu. Tyto vzorky byly připraveny požadovanou úpravou pro jednotlivé zkoušky, díky kterým se určí zpevňující efekt.

### **5.1 Příprava vzorků**

Pro provedení porovnání zpevňovacího efektu se musely navrhnout vzorky, na kterých se bude měření provádět. Hlavní část přípravy byla směřována k plochám, na kterých bude provedeno měření mikrotvrdosti. Tyto části jsou na obou porovnávaných součástech řešeny obdobně. Jednotlivé způsoby přípravy jsou popsány v příslušných kapitolách.

### **5.2 Navařování materiálu Inconel 625**

Navařování bylo provedeno na navařovacím stroji Fronius. Pro navaření požadované vrstvy bylo potřeba provést dva návary. Typická tloušťka vrstvy pro účely Off-Shore je 1/8“ (3,2 mm) a je požadována jako 2vrstvý návar z důvodu předepsané koncentrace Fe na jejím povrchu. Takto zhotovená vrstva byla proto zvolena i pro účel změření zpevnění návaru při obrábění.

Obrobek byl upnut do sklíčidla a vycentrován pro navařování. Poté se ustavila navařovací hubice na požadovanou vzdálenost, ve které se začínalo navařovat od konce 40 mm (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Příprava obrobku na navařování

Po zahájení navařování se musela neustále provádět kontrola teploty, která byla přenášena do obrobku z navařovacího oblouku. Měření teploty se provádělo pomocí kontaktního teploměru. Jakmile teplota přesáhla hodnoty  $400^{\circ}\text{C}$ , bylo nutno přerušit navařování a počkat dokud se teplota nesnížila na hodnotu  $200^{\circ}\text{C}$ . Toto přerušování muselo být dodržováno z toho důvodu, že při překročení teploty  $400^{\circ}\text{C}$  by navařovaný Inconel začal stékat po stěně dolů a došlo by ke znehodnocení navařování. Svařovací postup je Know How firmy V-NASS a popis navařování není předmětem diplomové práce.

Takto se navařila první vrstva materiálu a obdobně se navařila vrstva druhá (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Obrobek s navařeným Inconelem 625

### 5.3 Obrábění obrobku

Obrábění bylo prováděno dle výkresů: výkres č. 1 a výkres č. 2. Nejprve byly obrobena polotovary s potřebným přídavkem pro pozdější zkoušku.

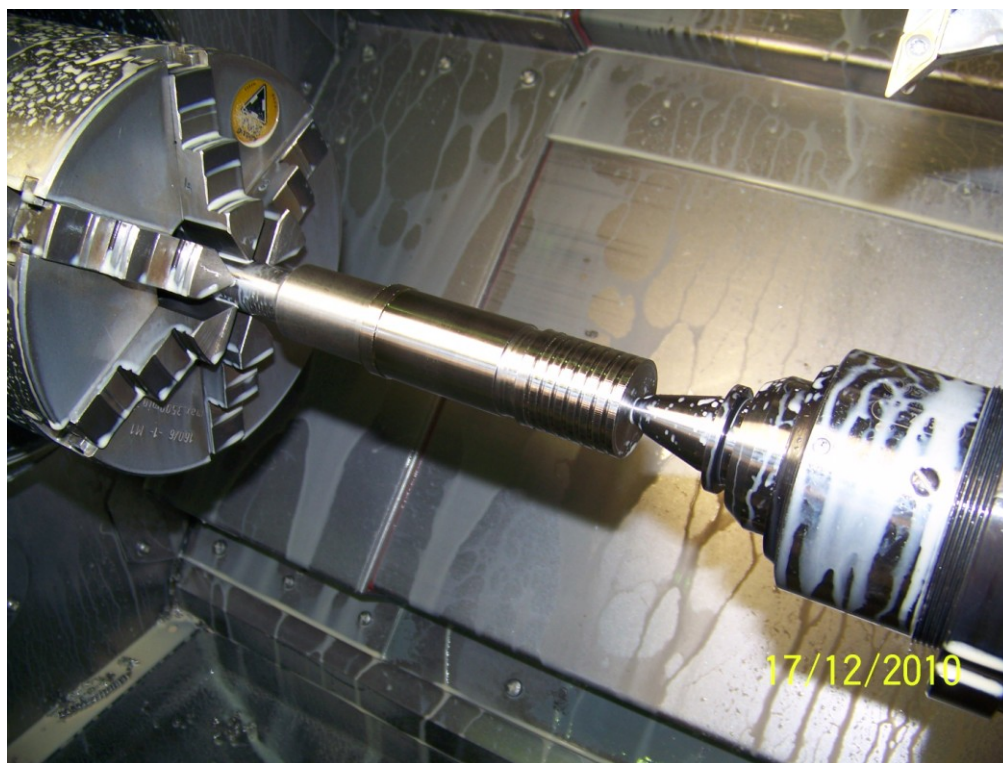
Opracování s navrženými posuvy viz. Tab. 5.1, bylo prováděno na stroji SP 280 CNC s řádně odladěným programem ve firmě V-NASS. Nejprve bylo soustruženo stranovým ubíracím nožem, potom následovalo obrábění upichovacím nožem.

Tab. 5.1 Tabulka navržených posuvů

Úsek [5 mm]	Posuv [mm]
1	0,20
2	0,15
3	0,10
4	0,07
5	0,05
6	0,03
7	0,02
8	0,01

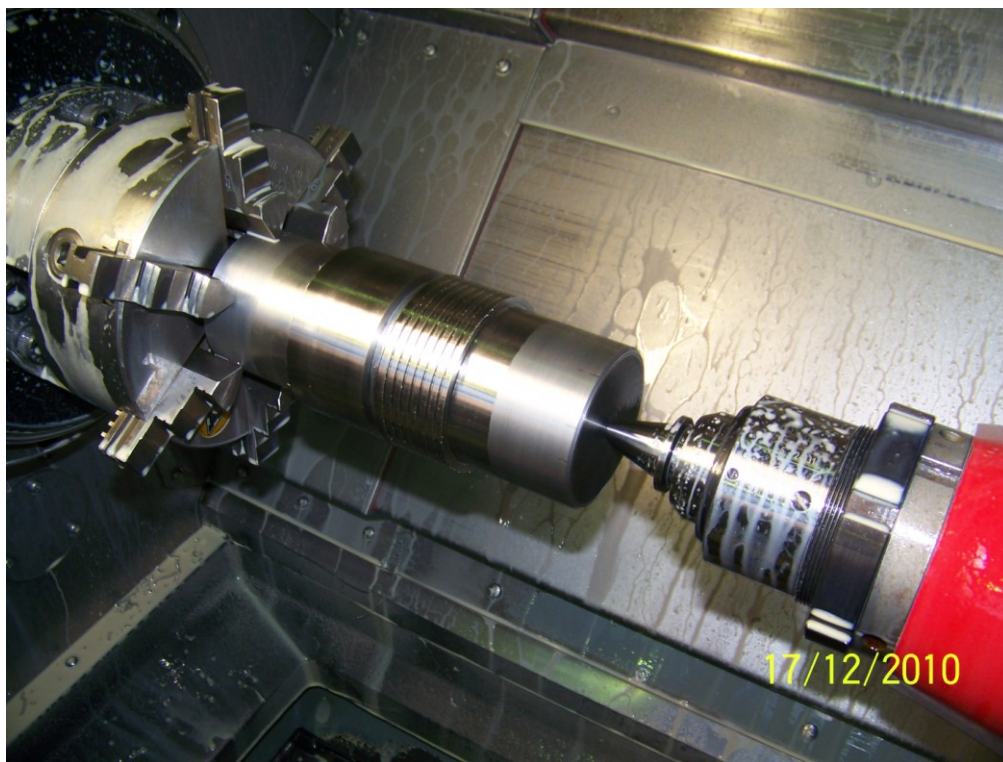
Po opracování polotovaru s potřebnými přídávky se polotovar upnul do stroje SP 280 CNC, kde se provedlo závěrečné opracování za použití jednotlivých posuvů. Opracování stranovým ubíracím nožem a upichovacím nožem, bylo provedeno během jednoho upnutí obrobku.

Tento postup výroby byl proveden u kovaného Inconelu viz Obr. 5.3 a také u navařeného Inconelu viz Obr. 5.4.



Obr. 5.3 Opracování kovaného Inconelu upichovacím a stranovým ubíracím nožem





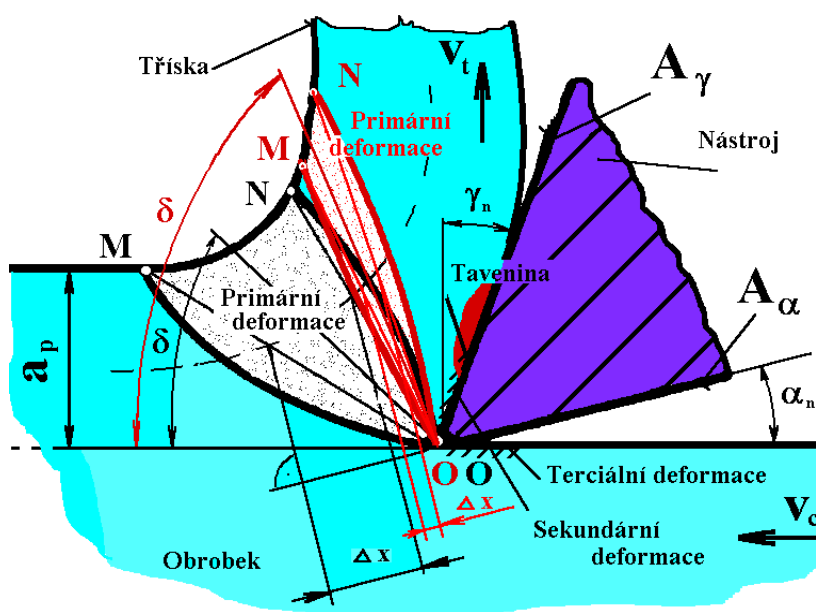
Obr. 5.4 Opracování navařeného Inconelu upichovacím a stranovým ubíracím nožem

## 6 Stanovení rozdílného zpevňovacího efektu při obrábění navařeného Inconelu 625 a kovaného Inconelu 625

Pro stanovení rozdílného zpevňovacího efektu při obrábění byly vybrány následující metody:

- porovnání tvrdosti podle Vickerse,
- porovnání tvrdosti podle Brinella,
- porovnání drsnosti povrchu.

Tyto porovnávací metody byly vybrány jako nejvhodnější pro porovnání zpevňujícího efektu povrchu materiálu. Tento efekt nastává při opracovávání materiálu během obrábění. Přesněji po celou dobu řezu třísky, při tomto řezu dochází vlivem tlaku nástroje na materiál obrobku k pěchování povrchové vrstvy za břitem nástroje (terciální deformace) viz Obr. 6.1. Takto zpevněná povrchová vrstva, která se vyznačuje velmi malou tloušťkou (řádově v setinách či desetinách milimetru), má poté špatný vliv na nástroj v záběru, protože zpevněná vrstva působí u druhé třísky na čelo nástroje. Čelo nástroje je tak vystavováno vyššímu zatížení a dochází k opotřebení nástroje nebo může dojít ke změně geometrie nástroje vlivem tvorby nárůstku.



Obr. 6.1 Tvorba třísky u „klasické“ a „HSC technologie“[5]



Je nutné stanovit rozdílnost zpevňujícího efektu při obrábění Inconelu navařeného a kovaného. Zjištěné rozdíly je možné v závěru práce aplikovat do návrhu optimálních řezných podmínek.

## 6.1 Tvrdost

Tvrdost je jednou z významných mechanických vlastností konstrukčních materiálů a je velmi často využívána v technické praxi. Hlavní předností při provádění zkoušek tvrdosti je jejich relativní jednoduchost, možnost opakování (nedestruktivní zkouška) a dále také skutečnost, že v mnoha případech lze měření provádět buď přímo na výrobku a jeho polotovarech nebo na zkušebních tělesech vyrobených a určených pro jiné druhy mechanických zkoušek[7].

Tvrdost lze definovat jako odolnost materiálu (povrchu materiálu v měřené lokalitě) proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem (vnikajícím tělesem neboli indentorem) přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení. Mírou tvrdosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace[7].

Zkoušky tvrdosti lze dělit podle různých hledisek. Podle principu rozeznáváme zkoušky vrypové, vnikající, nárazové a odrazové. Podle rychlosti působení zátěžové síly dělíme zkoušky tvrdosti na statické a dynamické, rozeznáváme zkoušky makro i mikrotvrdosti[7].

Nejpoužívanější, tj. statické zkoušky tvrdosti jsou charakteristické tím, že vnikající těleso tvrdoměru je vtlačováno do povrchu zkušební vzorku monotónně se zvyšující silou do dosažení předepsaného zatížení, které je pak udržováno na konstantní úrovni po určitou stanovenou dobu. Nejčastějšími metodami měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella a Vickerse. Základním a společným znakem těchto metod je vtlačování vnikajícího tělesa přesně definovaného tvaru a přesně definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu (Obr. 6.2).

V průběhu zkoušky vznikne na povrchu tělesa trvalý vtisk v důsledku rozvoje plastických deformací v okolí vnikajícího tělesa. Po odlehčení se geometrie vtisku proměňuje a jeho velikost je mírou odporu materiálu proti vnikání cizího tělesa. Hodnota tvrdosti se vypočte jako velikost trvalé deformace (plochy nebo hloubky vtisku) v relaci k působící zátěžové síle. Vnikající těleso přitom nesmí podléhat plastickým deformacím a musí proto vykazovat co nejvyšší tvrdost, modul a mez pružnosti[7].

Tvrdost není možné charakterizovat jako jednoznačně definovanou fyzikální veličinu, protože výsledek měření tvrdosti závisí na celé řadě vlivů, např.:

- na elastických vlastnostech měřeného materiálu, zejména na modulu pružnosti v tahu a ve smyku,
- na plastických vlastnostech zkoušeného materiálu, zejména na mezi kluzu a charakteru deformačního zpevnování,
- na velikosti zátěžové síly působící na vnikající těleso.

Tvrdost stejného kovu může mít různou tvrdost v závislosti:

- na velikosti zrna (jemnozrnné materiály vykazují vyšší hodnoty tvrdosti v důsledku vyššího odporu hranic zrn vůči vnikání cizího tělesa),
- na teplotě (v důsledku vyšší teploty se vlivem roztažnosti stávají vazby mezi atomy méně pevné),
- na množství cizích příměsí (veškeré příměsi, zejména heterogenní, snižují schopnost materiálu se plasticky deformovat a zvyšují tak tvrdost),
- na vnitřním pnutí (způsobené např. tvářením za studena, nerovnoměrným ochlazováním součástí atd. zvyšují tvrdost).

## 6.2 Mikrotvrdost

V tomto případě je měření tvrdosti realizováno vtlačováním diamantového tělesa tvaru Vickersova jehlanu do povrchu měřeného tělesa zatížením v rozsahu od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,807 N). Zatímco běžné zkoušky (makro) tvrdosti podle Vickerse jsou prováděny při zatíženích mezi 10 a 1200 N, první použití sil nižších než 10 N se datuje do roku 1932, kdy byly tyto zkoušky provedeny v National Physical Laboratory ve velké Británii.

S klesajícími aplikovanými silami (se zmenšující se velikostí vtisku) při měření tvrdosti přesnost měření klesá. Navíc s klesající zátěžovou silou do oblasti mikrotvrdosti již není Vickersova tvrdost (jako je tomu na základě geometrické podobnosti vtisků u hodnot makrotvrdosti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení[7].

Protože vtisky při zkoušení mikrotvrdosti jsou malé, je použití této metody vhodné pro:

- malé nebo tenké součásti,
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušební vzorku,
- měření mikrotvrdosti strukturních složek a fází,
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování,
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků,
- hodnocení svarových spojů,
- pro hodnocení oduhličujících procesů,
- studium difúzních pochodů,
- měření křehkých materiálů.

## **6.3 Zkouška tvrdosti podle VICKERSE**

Tato zkouška byla vyvinuta v Anglii a poprvé byla popsána R. L. Smithem a G. E. Sandlandem v roce 1922. Pojmenována byla podle prvního tvrdoměru daného typu, který byl zkonstruován ve firmě Vickers. Je to metoda velmi přesná a citlivá, používaná hlavně v laboratořích, je rozšířena především v Evropě[7].

Pro tuto metodu platí norma ČSN EN ISO 6507, která předepisuje metodu měření tvrdosti podle Vickerse pro kovové materiály.

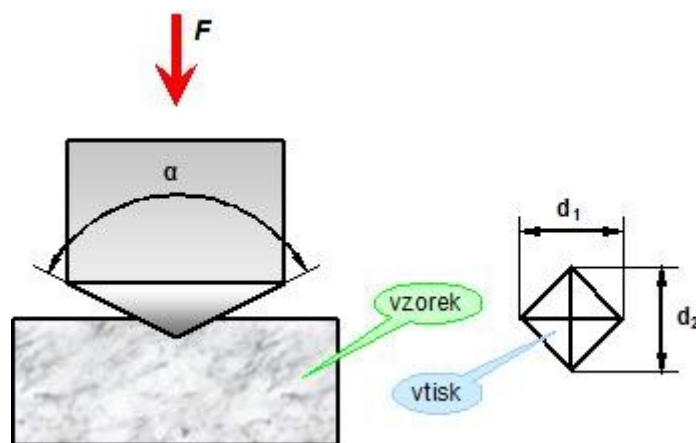
### **6.3.1 Podstata zkoušky**

Vickersova zkouška pracuje, na principu vnikajícího tělesa, které má tvar diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ , tento jehlan je do

zkušebního tělesa vlačován pod tíhou zkušebního zatížení (Tab. 6.1), které působí ve směru kolmém po stanovenou dobu. Po odlehčení se provede změření úhlopříčky vtisku (Obr. 6.2). Tvrdost podle Vickerse se vyjadřuje jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku.

Tab. 6.1 Druhy měření tvrdosti podle Vickerse[7]

Označení	Symbol tvrdosti	Zkušební zatížení F [N]	Zkušební metoda
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	HV 5 ÷ HV 100	49,03 ÷ 980,7	ČSN EN ISO 6507/1
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 ÷ < HV 5	1,961 ÷ < 49,07	ČSN EN ISO 6507/2
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	< HV 0,2	< 1,961	ČSN EN ISO 6507/3



Obr. 6.2 Schéma měření tvrdosti podle Vickerse [7]



Obr. 6.3 Ukázka vtisku při zkoušce tvrdosti podle Vickerse [7]

### 6.3.2 Vztah výpočtu tvrdosti podle Vickerse

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

HV.....tvrdost podle Vickerse

F.....zkušební zatížení [N]

$\alpha$ .....vrcholový úhel vnikajícího tělesa (jehlanu)

d.....úhlopříčka vtisku [mm]

### 6.3.3 Zkoušené těleso

Zkouška se provádí na povrchu, který musí být rovný a hladký, dále nesmí obsahovat okujené vrstvy a zejména musí být očištěn od mazadel. Povrch tělesa musí být upraven tak, aby při odměřování rozměru vtisku nemohlo dojít k nepřesnostem. Tloušťka zkušebního tělesa musí být nejméně 1,5xd (kde d je úhlopříčka vtisku). Po zkoušce nesmí být na protilehlé straně patrné žádné viditelné stopy deformace.

### 6.3.4 Postup zkoušky

Pro úspěšné provedení zkoušky musí být v místnosti, ve které se provádí měření, okolní teplota v rozmezí 10 – 35°C pro dodržení podmínek pro měření. V arbitrážních případech se zkoušení provádí při teplotách  $23 \pm 5$  °C. Po dobu zkoušky musí být zkušební přístroj zabezpečen proti rázům a chvění, které by mohly ovlivnit výsledky zkoušky.

Zkoušené těleso se ustaví tak, aby nedošlo k pohnutí nebo vychýlení. Vnikající těleso, které má tvar diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°, musí být zatlačováno do zkoušeného tělesa zkušebním zatížením, které směřuje kolmo k jeho povrchu. Doba, po kterou je těleso zatěžováno od počátku zatěžování do jeho plné hodnoty nesmí překročit dobu 10 sekund. Rychlost vnikání tělesa nesmí překročit hodnotu  $200 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Doba, po kterou je těleso plně zatěžováno je v rozmezí 10 až 15 sekund.

Po provedení měření jsou odečteny délky úhlopříček. Tyto úhlopříčky slouží k výpočtu jejich aritmetického průměru. Pomocí tohoto aritmetického průměru se stanoví tvrdost podle Vickerse.

Hodnota tvrdosti podle Vickerse se určí z normovaných tabulek podle používaného zatížení a výsledku aritmetického průměru  $d$ , získaného výpočtem.

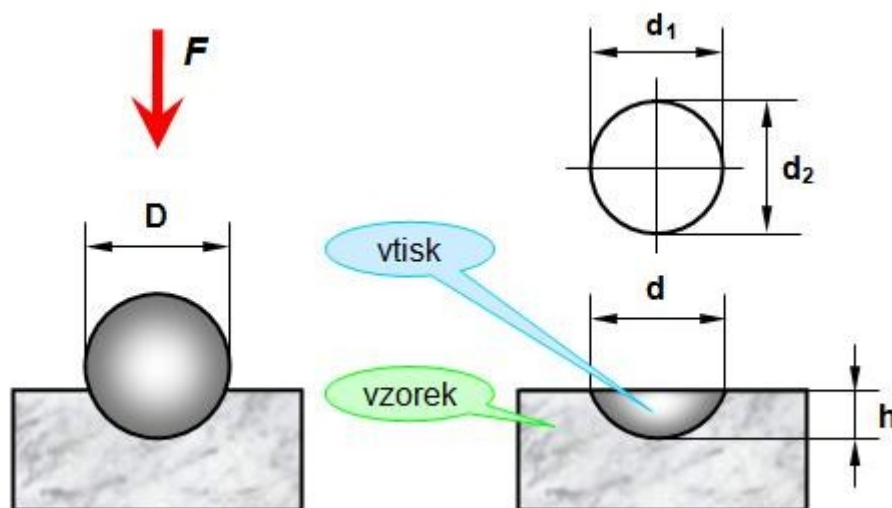
## **6.4 Zkouška tvrdosti podle BRINELLA**

Autorem této metody je švédský inženýr J. A. Brinell. Metoda byla poprvé představena v roce 1900 na 2. Mezinárodním kongresu o zkoušení materiálů a dnes je nejrozšířenější zkouškou tvrdosti na světě. Je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Zkouší se poměrně velký objem kovu, čímž získáme průměrnou hodnotu tvrdosti celé struktury materiálu[8].

V současnosti u nás pro tuto zkoušku platí norma ČSN EN ISO 6506, která byla schválena 1. 12. 2000.

### 6.4.1 Princip metody

Princip metody (Obr. 6.4) spočívá v zatlačování vnikajícího tělesa – kalené ocelové kuličky (metoda HBS) nebo kuličky z tvrdokovu (metoda HBW) o průměru  $D$  – do povrchu zkoušeného tělesa silou  $F$ . Po odlehčení se určí průměr vtisku  $d$ .



Obr. 6.4 Schéma měření tvrdosti podle Brinella[8]

#### 6.4.2 Vztah výpočtu tvrdosti podle Brinella

$$HBS = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

HBS... tvrdost podle Brinella

F.....zkušební zatížení v [N]

D..... průměr kuličky v [mm]

d..... aritmetický průměr vtisku v [mm];  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

h..... hloubka vtisku v [mm];  $h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$

#### 6.4.3 Postup zkoušky

Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména bez mazadel. Zkoušené těleso musí mít povrch připraven tak, aby dovolil přesné měření průměru vtisku. Při úpravě povrchu je nutno postupovat tak, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění vlastností povrchu ohřevem nebo tvářením za studena. Tloušťka zkoušeného tělesa musí být nejméně osminásobek předpokládané hloubky vtisku a na protilehlé straně zkušebního tělesa nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace.

Zkouška by měla probíhat při teplotách okolí v rozmezí  $10 \div 35$  °C, a v arbitrážních případech se zkouška provádí při teplotách  $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ . Zatížení se volí tak, aby průměr vtisku  $d$  byl v rozmezí  $0,24 \div 0,60$  poměru vnikající kuličky  $D$ . Pro nejreprezentativnější výsledky zkoušky měření probíhá na co největším možném povrchu zkoušeného tělesa i průměru kuličky. Jestliže to tloušťka zkoušeného tělesa dovolí, používá se kulička o průměru 10 mm. Zkoušené těleso musí být uloženo na tuhé podložce a zajištěno proti pohybu.

Při zahájení zkoušky je vnikající těleso zatlačováno do zkoušeného materiálu zkušebními zatíženími  $F$ , které směřuje kolmo k jejímu povrchu. Doba od počátku zatěžování



do dosažení plného zatížení musí být v rozmezí 2 až 8 sekund. Doba, po kterou je zkoušený vzorek zatěžován plnou silou je v rozmezí 10 až 15 sekund.

V průběhu zkoušky nesmí být měřicí stroj vystaven rázům a chvění, které by ovlivnily výsledek zkoušky. Průměr vtisku se měří pomocí dvou na sebe kolmých průměrů  $d_1$  a  $d_2$ , tyto průměry se využívají pro stanovení tvrdosti podle Brinella za pomoci aritmetického průměru  $d$  obou změřených hodnot. Hodnota tvrdosti se poté určí z tabulek v normě, podle velikosti zatížení  $F$  a průměru  $d$  vtisku.

## 7 Praktické zkoušky měření tvrdosti opracovaných ploch vzorků

### 7.1 Měřicí přístroj AMH43-Series pro měření mikrotvrdosti

Společnost LECO vyvinula nový způsob pro automatizované zkoušení tvrdosti pomocí stroje AMH43 (Obr. 7.1). Systém využívá vizuální metodu pro rekonstrukci vzorku společně s detailním rozpoznáváním obrazu.

Hodí se pro celou řadu aplikací, jako je měření hloubky cementované vrstvy, povrchovou analýzu, svařovaný profil a povrchovou tvrdost. Dokáže snímat údaje z různého povrchu, také z poškrábaných, poleptaných nebo nerovnoměrně osvětlených ploch.

Celkový pohled je automaticky zkonstruovaný pomocí softwaru. Díky tomu je možné odhalit tvar, umístění a velikost každé nerovnosti před vtiskem a pomocí toho se dá vyhnout povrchovým nedokonalostem a zlepšení kvality vtisku.



Obr. 7.1 AMH43-Serie Automatický systém pro měření tvrdosti[9]

Technické parametry:

- Vykreslení okraje dle skenovaného zobrazení.
- Zdokonalená technologie pro práci s obrazem.
- Měří i poškrábané a nerovnoměrně osvětlené plochy.
- Jednoduché ovládání pomocí joysticku.
- Podporuje mikro i makro zatížení.

Zkoušení mikrotvrdosti:

- LM-serie vytvoří zatížení 10g až 1000g.
- Používá metody Vickerse.
- Mikro rozlišení profilu ve dvou osách 100 x 75 mm.
- Nastavitelné krokové ovládání vysokorychlostního 0.1  $\mu\text{m}$  autofokusu.

CCD Video kamera:

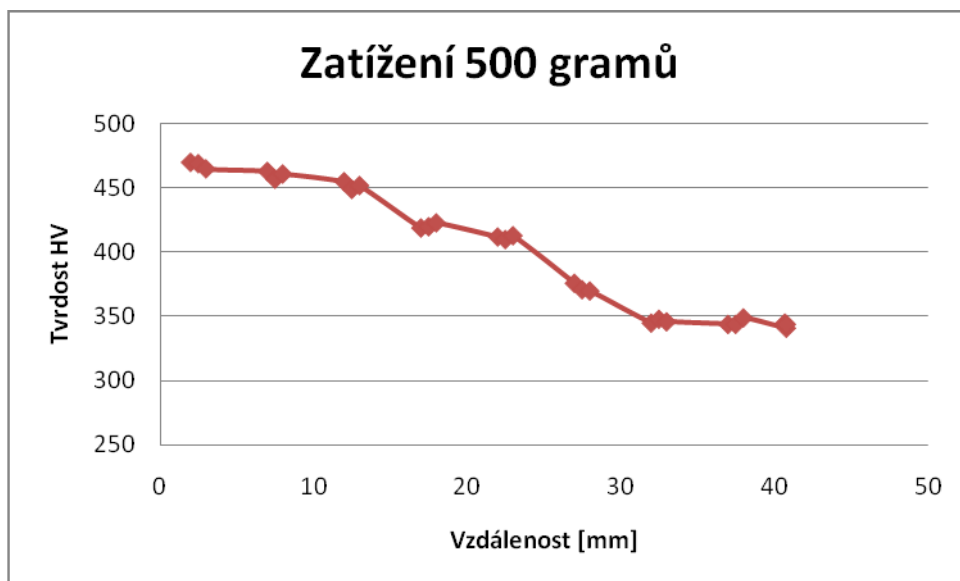
- Vysoké rozlišení kamery 640 x 480 pixelů.
- 100% lineární s 1% geometrickým zakřivením.

## **7.2 Výsledky naměřených hodnot u vzorků z celoobjemového Inconelu**

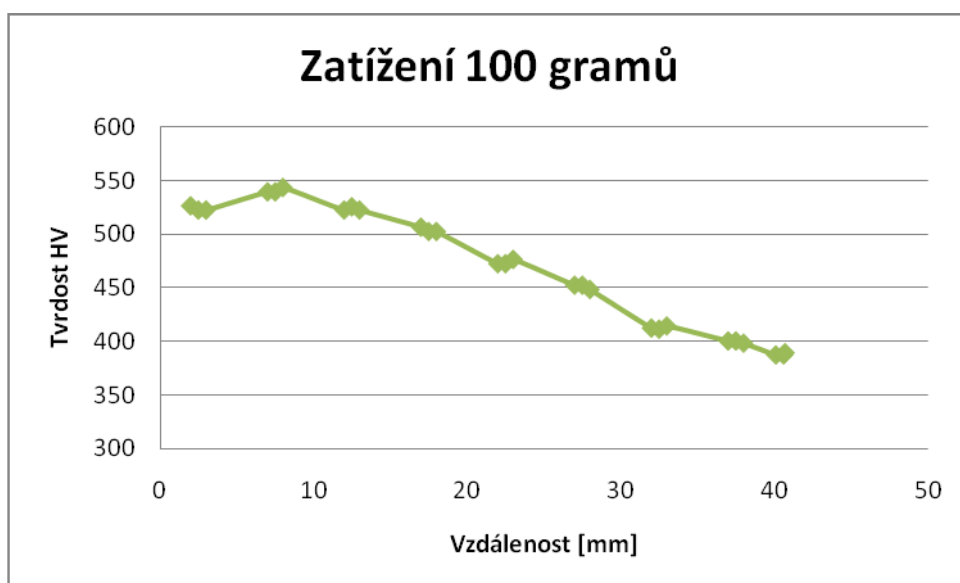
Měření bylo prováděno na stroji AMH43-Serie s různými zatíženími. Zatížení 500, 100 a 50 gramů, bylo zvoleno pro objektivnější zjištění tvrdosti povrchové vrstvy. U všech jednotlivých posuvů byly provedeny vždy 3 vpichy pro vyloučení chyb, které mohly nastat během měření.

### **7.2.1 Měření tvrdosti povrchu opracované plochy stranovým ubíracím nožem**

Jako první bylo měření provedeno na vzorku, který byl opracován pomocí stranového ubíracího nože. Směr měření byl prováděn ve směru předem zvoleného nárůstu posuvu.



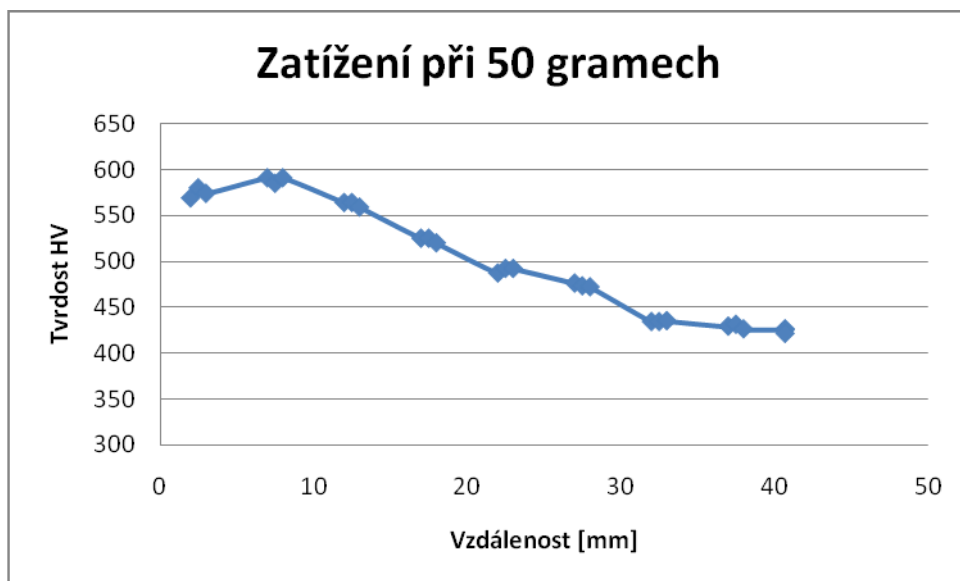
Graf 7.1 Znázornění tvrdosti při zatížení 500 gramů



Graf 7.2 Znázornění tvrdosti při zatížení 100 gramů

Tab. 7.1 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů

Vzorek 2/674/3		
Vzdálenost (mm)	Tvrdost HV	HRC
2	569	53,5
2,5	580	54,2
3	574	53,8
7	591	54,8
7,5	585	54,8
8	591	54,8
12	564	53,2
12,5	564	53,2
13	559	52,9
17	525	50,8
17,5	525	50,8
18	520	50,4
22	487	48,2
22,5	492	48,6
23	492	48,6
27	476	47,4
27,5	473	47,1
28	472	47,1
32	434	44
32,5	434	44
33	435	44,1
37	429	43,6
37,5	431	43,7
38	426	43,2
40,7	426	43,2
40,7	425	43,1
40,7	421	42,8
Průměr	500	
Min	421	
Max	591	
Rsd	12,5	



Graf 7.3 Znázornění tvrdosti při zatížení 50 gramů

### 7.2.2 Zhodnocení naměřených hodnot

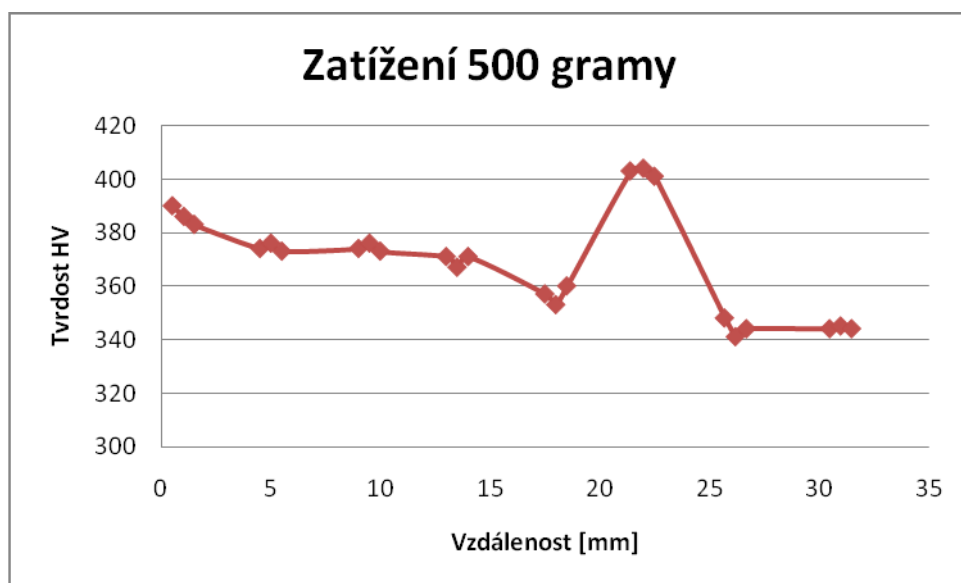
Z grafů lze zřetelně vypožorovat zpevňující efekt opracované povrchové vrstvy. Jako nejobjektivnější se ukazuje měření se zatížením 50 gramy, při kterém dochází k nejmenšímu prostupu (respektive proražení) měřícího hrotu přes zpevněnou vrstvu a v důsledku toho k naměření nižší tvrdosti. Tento efekt je patrný při porovnání velikosti tvrdosti prvního vpichu při různém zatížení. Při 500 gramech byla tvrdost 470 HV, u zatížení 100 gramů již 526 HV a při nejnižším zatížení 50 gramů naměřená tvrdost stoupla na 569 gramů.

Hodnoty tvrdosti HV klesají úměrně s rostoucím posuvem. Tento efekt je nejvíce patrný mezi posuvy 0,02 a 0,15 mm, u posuvů 0,01 a 0,02 mm jsou hodnoty tvrdosti podobné mezi 569 HV až 591 HV, poté následuje pokles až na 434 HV (při posuvech mezi hodnotami 0,02 a 0,15 mm) a opět zůstává na přibližně stejné hodnotě mezi 434 a 421 HV (u posuvů 0,01; 0,15 a 0,20 mm).

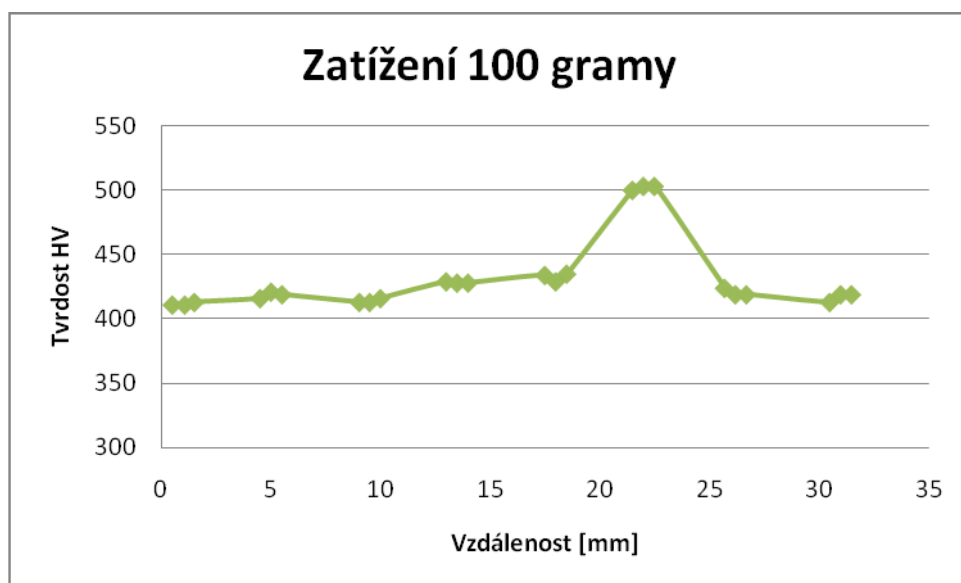
Z tohoto je patrné, že největší zpevnění vzniká při nižších posuvech a postupně se snižuje se zvyšujícím se posuvem.

### 7.2.3 Měření tvrdosti povrchu opracované plochy upichovacím nožem

Měřila se tvrdost, které bylo docíleno na povrchu při obrábění upichovacím nožem. Pro lepší odměřování jednotlivých vzdáleností posuvů byly povrchy zápichů odděleny drážkami. Měření se provádělo ve směru předem zvoleného nárůstu posuvu, stejně jako v případě měření tvrdosti obráběné plochy stranovým ubíracím nožem.



Graf 7.4 Znárodnění tvrdosti při zatížení 500 gramů

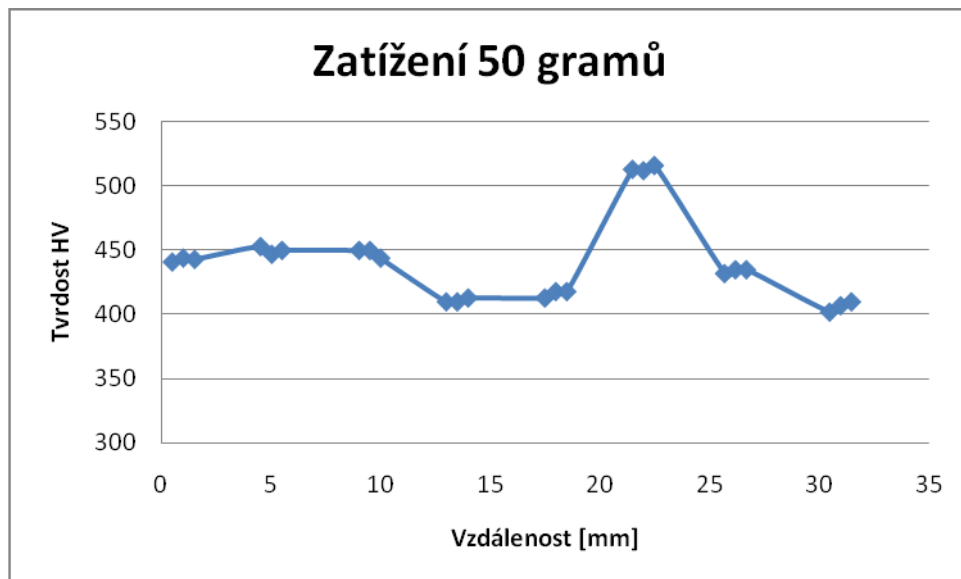


Graf 7.5 Znárodnění tvrdosti při zatížení 100 gramů

Tab. 7.2 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů

Vzorek 1/674/3		
Vzdálenost (mm)	Tvrdost HV	HRC
0,49	441	44,6
0,992	444	44,8
1,51	443	44,7
4,52	453	45,7
5,03	447	45,1
5,5	450	45,4
9,02	450	45,4
9,51	450	45,4
10	444	44,8
13	410	41,8
13,5	410	41,8
14	413	42
17,5	413	42
18	418	42,5
18,5	418	42,5
21,5	414	50
22	412	49,9
22,5	416	50,2
25,7	432	43,8
26,2	435	44,1
26,7	435	44,1
30,5	402	41
31	407	41,5
31,5	410	41,8
Půměr	440	
Min	402	
Max	516	
Rsd	7,43	





Graf 7.6 Znázornění tvrdosti při zatížení 50 gramů

#### 7.2.4 Zhodnocení naměřených hodnot

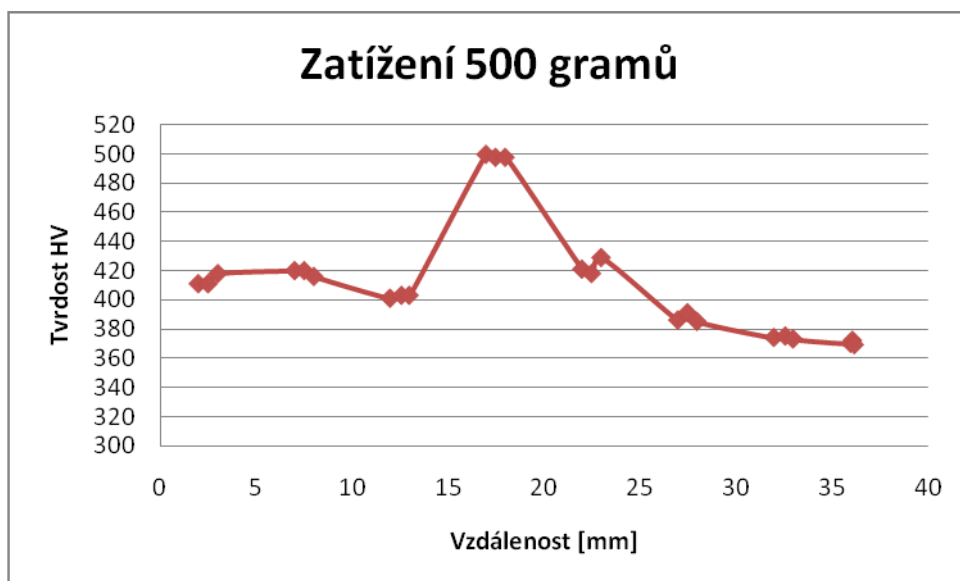
Z grafu je patrné, že po opracování nedochází k výrazným změnám tvrdosti povrchové vrstvy. Tvrdość zůstává po celou dobu měření v rozmezí  $402 \div 453$  HV. Při prvních posuvech 0,01; 0,02 a 0,03 mm zůstává tvrdost v rozmezí  $441 \div 453$  HV. Poté následuje mírný pokles na hodnotu 410 HV u posuvu 0,05 mm, u které už zůstanou.

Výjimka nastává pouze u posuvu 0,1 mm, kdy tvrdost prudce vzroste na hodnotu 516 HV a po tomto vychýlení se opět vrací zpět. Toto vychýlení je pravděpodobně způsobené místní nehomogenitou materiálu (dle odborníků V-NASS je tato nehomogenita pro Inconel typická).

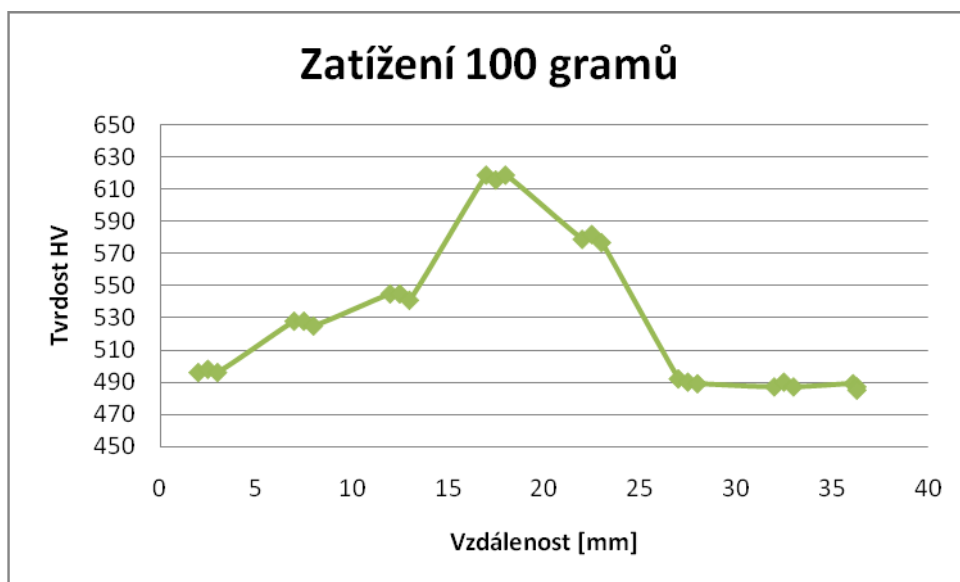
### 7.3 Výsledky naměřených hodnot u vzorků z navařeného Inconelu

Měření bylo prováděno stejně jako u měření celoobjemového Inconelu, což umožňuje snadné porovnání obou vzorků. To znamená za použití zatížení 50, 100 a 500 gramů.

#### 7.3.1 Měření tvrdosti povrchu opracované plochy stranovým ubíracím nožem



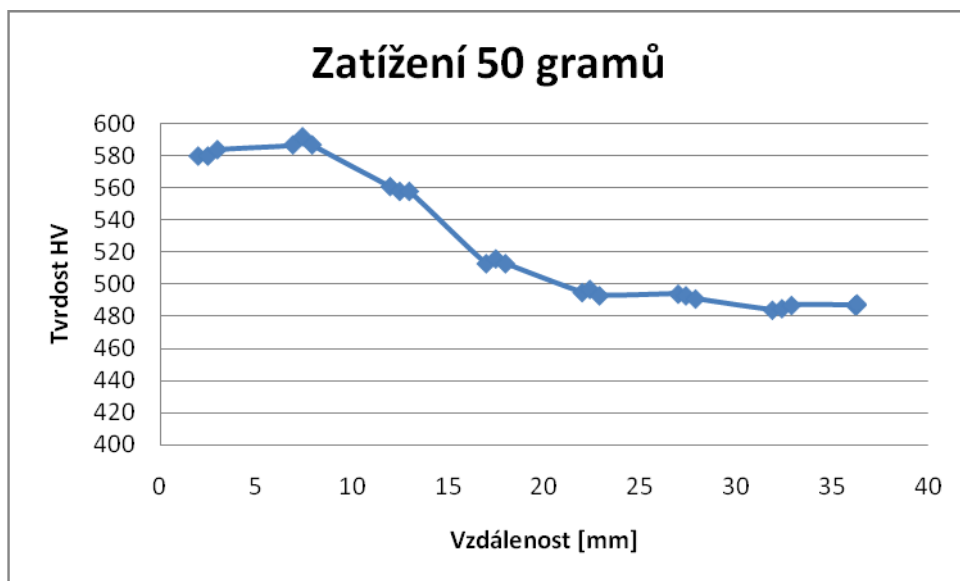
Graf 7.7 Znázornění tvrdosti při zatížení 500 gramů



Graf 7.8 Znázornění tvrdosti při zatížení 100 gramů

Tab. 7.3 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů

Vzorek 4/2		
Vzdálenost (mm)	Tvrdost HV	HRC
2,01	580	54,2
2,51	580	54,2
3,01	584	54,4
6,94	587	54,6
7,44	592	54,8
7,94	587	54,6
12	561	53,1
12,5	558	52,9
13	558	52,9
17	513	50
17,5	516	50,2
18	513	50
22	495	48,8
22,4	497	48,9
22,9	493	48,6
27	494	48,7
27,4	493	48,6
27,9	491	48,5
31,9	484	48
32,4	485	48,1
32,9	487	48,2
36,2	487	48,2
36,3	487	48,2
36,3	488	48,3
Průměr	525	
Min	484	
Max	592	
Rsd	8	

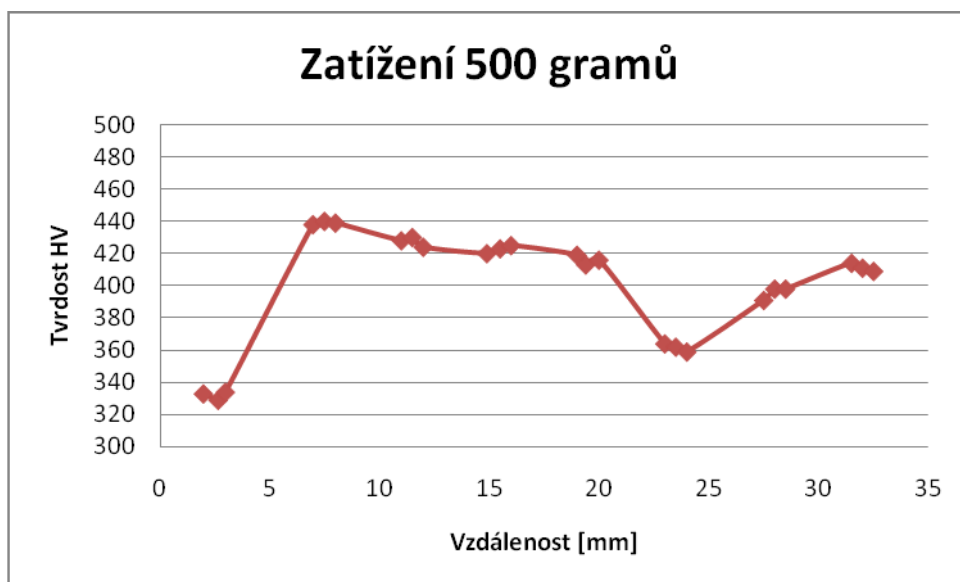


Graf 7.9 Znázornění tvrdosti při zatížení 50 gramů

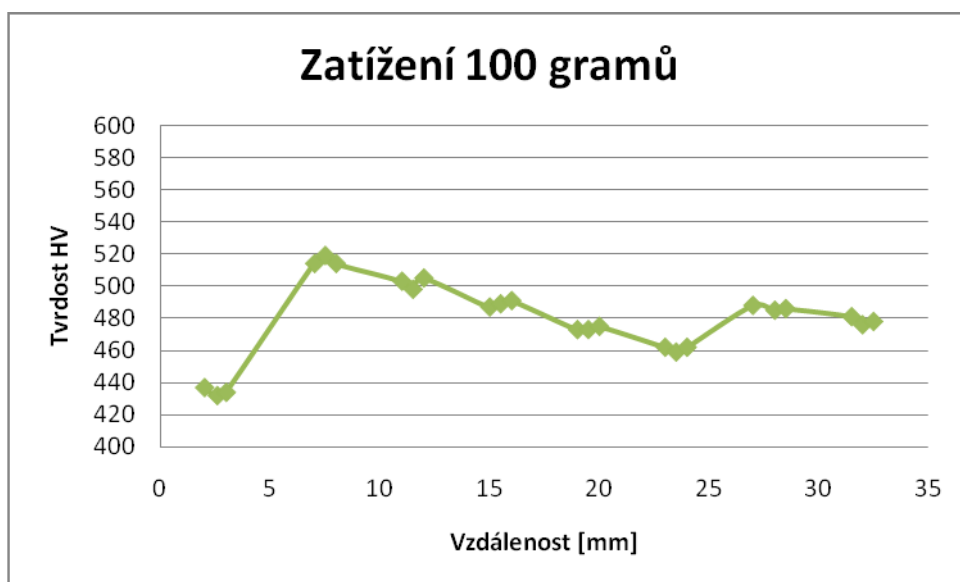
### 7.3.2 Zhodnocení naměřených hodnot

Výsledky měření prokázaly nevhodnost vyššího zatížení hrotu z důvodu proražení zpevněné opracované plochy, proto jsou vyhodnocovány pouze výsledky při zatížení 50 gramů. Zde lze přehledně pozorovat klesající tvrdost povrchu s měnícím se posuvem. Klesání nastává u posuvu 0,01 mm na hodnotě 584 HV a klesá po celou dobu až na hodnotu 487 HV na posuvu 0,2 mm. Nejvýraznější klesání nastává mezi posuvy 0,15 mm a 0,05 mm, kde tvrdost během změn posuvu klesne z hodnoty 592 HV až na hodnotu 493 HV, tedy pokles téměř o 100 HV.

### 7.3.3 Měření tvrdosti povrchu opracované plochy upichovacím nožem



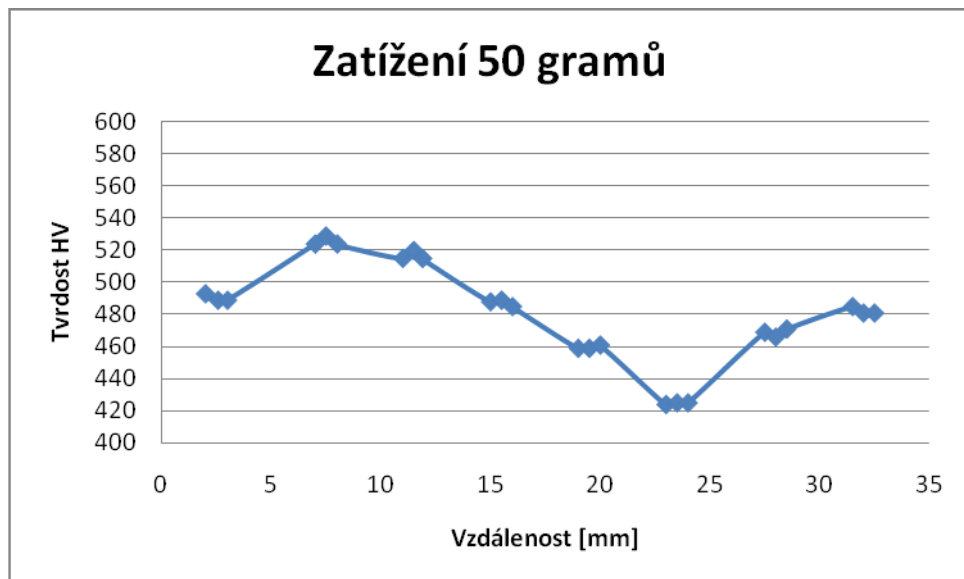
Graf 7.10 Znázornění tvrdosti při zatížení 500 gramů



Graf 7.11 Znázornění tvrdosti při zatížení 100 gramů

Tab. 7.4 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů

Vzorek 3/2		
Vzdálenost (mm)	Tvrdost HV	HRC
2,01	493	48,6
2,58	489	48,3
3,01	489	48,3
7,01	524	50,7
7,5	529	51,1
8,01	524	50,7
11	515	50,1
11,5	520	50,4
11,9	515	50,1
15	488	48,3
15,5	489	48,3
16	485	48,1
19	459	46,1
19,5	459	46,1
20	461	46,3
23	424	43,1
23,5	425	43,2
24	425	43,2
27,5	469	46,8
28	466	46,6
28,5	471	47
31,5	485	48,1
32	481	47,8
32,5	481	47,8
Průměr	482	
Min	424	
Max	529	
Rsd	6,34	



Graf 7.12 Znázornění tvrdosti při zatížení 50 gramů

#### 7.3.4 Zhodnocení naměřených hodnot

Tvrdość začíná na hodnotě 489 HV u nejvyššího posuvu 0,2 mm, poté následuje růst na hodnotu 529 HV při posuvu 0,15 mm. Následně dochází k pozvolnému poklesu na hodnotu 424 HV u posuvu 0,03 mm. Po tomto poklesu následuje u zbývajících dvou posuvů růst až na hodnotu 485 HV, při nejnižším posuvu 0,01 mm.

V tomto případě dochází ke snižování tvrdosti v závislosti na snižování posuvu podobně, jako tomu bylo u obráběné plochy stranovým ubíracím nožem. Následný nárůst tvrdosti je pravděpodobně opět způsoben nehomogenitou materiálu Inconel.

## 7.4 Výsledky naměřených hodnot tvrdosti obrobených ploch podle Brinella

Toto měření bylo zvoleno na základě rozdílných údajů, získaných při měření mikrotvrdosti podle Vickerse. Při měření tvrdosti metodou Vickers bylo zjištěno, že tvrdost u navařeného materiálu Inconel 625 je vyšší o 26 HV, v případě kdy byl materiál opracováván stranovým ubíracím nožem. V případě, kdy byl materiál opracováván metodou za použití upichovacího nože byl rozdíl vyšší o 42 HV. Obě hodnoty jsou hodnotami průměrnými při zatížení 50 gramy.

Z tohoto důvodu byla provedena zkouška tvrdosti podle Brinella pro zjištění tvrdosti základního materiálu celoobjemového a navařeného Inconelu.

Zkouška byla provedena na měřícím přístroji FOUNDRAX VM-19 viz. Obr. 7.2.



Obr. 7.2 Měřicí přístroj FOUNDRAX VM-19



Na tomto přístroji byly naměřeny hodnoty tvrdosti:

- 197 HB pro celoobjemový výkovek Inconelu 625
- 229 HB pro navařený Inconel 625.

Z těchto naměřených hodnot vyplývá, že navařený Inconel 625 má vyšší tvrdost než celoobjemový Inconel.

Umístění měřicího vpichu je názorné na Obr. 7.3, vedle vpichu lze vidět napsaná naměřená tvrdost.



Obr. 7.3 Vpichy po měření tvrdosti podle Brinella

## 7.5 Výsledky měření drsnosti povrchu

Pro zjištění, jaký vliv mají jednotlivé posuvy 0,2 mm, 0,15 mm, 0,10 mm, 0,07 mm, 0,05 mm, 0,03 mm, 0,02 mm a 0,01 mm na drsnost povrchu byla provedena praktická měření.

Měření bylo provedeno na měřicím přístroji Mitutoyo SJ400 viz. Obr. 7.4. Měření probíhalo pomocí sondy, která snímala drsnost na povrchu vzorků. Tyto údaje zasílala do vyhodnocovacího zařízení, které vypočetlo výslednou drsnost povrchu.



Obr. 7.4 Přístroj Mitutoyo SJ400 pro měření drsnosti povrchu

### **7.5.1 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu opracovaných ploch**

Jako první byly naměřeny hodnoty drsnosti povrchu u vzorků s navařeným materiálem Inconel 625. Pro každou oblast působení určitým posuvem byla naměřena drsnost povrchu viz. Tab. 7.5 a Tab. 7.6.

Tab. 7.5 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování upichovacím nožem

Vzorek 3	
Posuvy [mm]	Drsnost Ra
0,20	0,41
0,15	0,50
0,10	0,44
0,07	0,40
0,05	0,36
0,03	0,45
0,02	0,35
0,01	0,60

Tab. 7.6 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování stranovým ubíracím nožem

Vzorek 4	
Posuvy [mm]	Drsnost Ra
0,20	1,36
0,15	1,22
0,10	1,02
0,07	1,44
0,05	1,07
0,03	0,31
0,02	0,23
0,01	0,25

Z tabulek je patrné, že po opracování upichovacím nožem se drsnost pohybuje pouze v rozmezí  $0,35 \div 0,60$  Ra. Zatímco po opracování stranovým ubíracím nožem se drsnost pohybuje v rozmezí  $0,23 \div 1,36$  Ra. Drsnost roste postupně od nejnižší drsnosti 0,25 Ra, která byla naměřena při posuvu 0,01 mm až k drsnosti 1,36 Ra na nejvyšším posuvu 0,20 mm. Z toho vyplývá, že se zvětšujícím se posuvem roste úměrně také drsnost povrchu při obrábění Inconelu pomocí stranového ubíracího nože.

Dále bylo provedeno měření drsnosti na opracované ploše u celoobjemového vzorku Inconelu viz Tab. 7.7 a Tab. 7.8.

Tab. 7.7 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování upichovacím nožem

Vzorek 1	
Posuvy [mm]	Drsnost Ra
0,20	3,07
0,15	2,01
0,10	1,44
0,07	0,51
0,05	0,17
0,03	0,16
0,02	0,21
0,01	1,28

Tab. 7.8 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování stranovým ubíracím nožem

Vzorek 2	
Posuvy [mm]	Drsnost Ra
0,20	1,38
0,15	1,00
0,10	0,51
0,07	0,26
0,05	0,29
0,03	0,27
0,02	0,25
0,01	0,22

Z tabulek Tab. 7.7 a Tab. 7.8 je patrné, že drsnost u obou vzorků má klesající tendenci se snižujícím se posuvem. U opracování upichovacím nožem klesá z hodnoty drsnosti 3,07 Ra při posuvu 0,2 mm až na hodnotu 0,21 Ra, která je při posuvu 0,02 mm. Poté u posledního posuvu 0,01 mm vzroste na 1,28 Ra.

Při opracování stranovým ubíracím nožem drsnost také klesá, při posuvu 0,2 mm je drsnost 1,38 Ra a z této hodnoty klesá až na drsnost 0,26 Ra na posuvu 0,07 mm. Poté již klesání hodnoty drsnosti probíhá velmi pozvolna až na hodnotu 0,22 Ra, která byla naměřena při posuvu 0,01 mm.

## **8 Vyhodnocení naměřených hodnot**

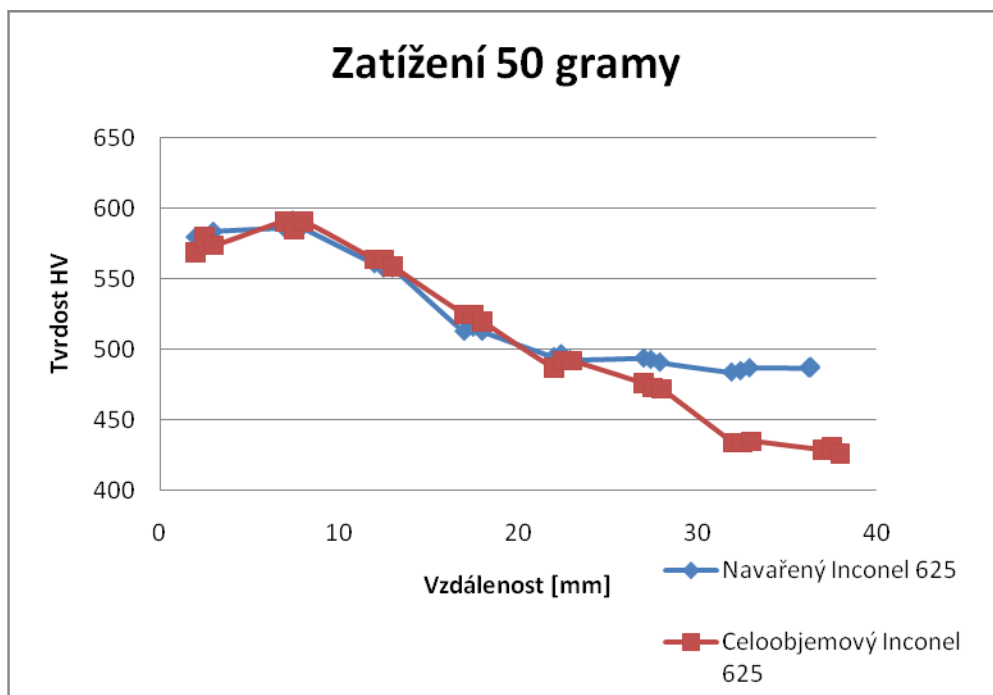
Vyhodnocení sestávalo z porovnání výsledků naměřených tvrdostí povrchové vrstvy podle Vickerse a podle Brinella. Dalšími naměřenými hodnotami byly hodnoty drsnosti povrchu po opracování. Všechna měření byla provedena na dvou vzorcích z celoobjemového a navařeného Inconelu.

### **8.1 Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti povrchu podle Vickerse**

Naměřené hodnoty jsou zapsány v přílohách (Příloha č. 1, Příloha č. 2, Příloha č. 3, Příloha č. 4). Pro vyhodnocení budou použity hodnoty získané měřením při zatížení 50 gramy. Toto zatížení bylo vyhodnoceno jako nejlépe vypovídající o vlivu opracování na tvrdost povrchové vrstvy.

#### **8.1.1 Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti plochy opracované stranovým ubíracím nožem**

Pro vyhodnocení naměřených hodnot byly použity grafy získané v předcházejí kapitole viz. Graf 7.3 a Graf 7.9. Pro porovnání byly oba grafy vsazeny do jednotného grafu viz. Graf 8.1. Z grafu lze přehledně vyčíst rozdílnou tvrdost povrchu u celoobjemového a navařeného materiálu Inconel 625.



Graf 8.1 Porovnání tvrdosti HV při zatížení 50 gramy

Z grafu lze vyčíst, že na prvním úseku kde byl použit posuv 0,01 mm je tvrdost u celoobjemového Inconelu 580 HV. Tyto hodnoty jsou podobné hodnotám na stejném úseku u navařeného Inconelu 584 HV. Z tohoto vyplývá, že rozdílnost tvrdosti materiálu při použití tohoto posuvu je zanedbatelná, cca 4 HV.

Při dalším snížení posuvu tvrdost mírně naroste na hodnoty 885 HV u obou vzorků při posuvu 0,02 mm. Při dalším snižování posuvů dochází k předpokládanému snižování tvrdosti.

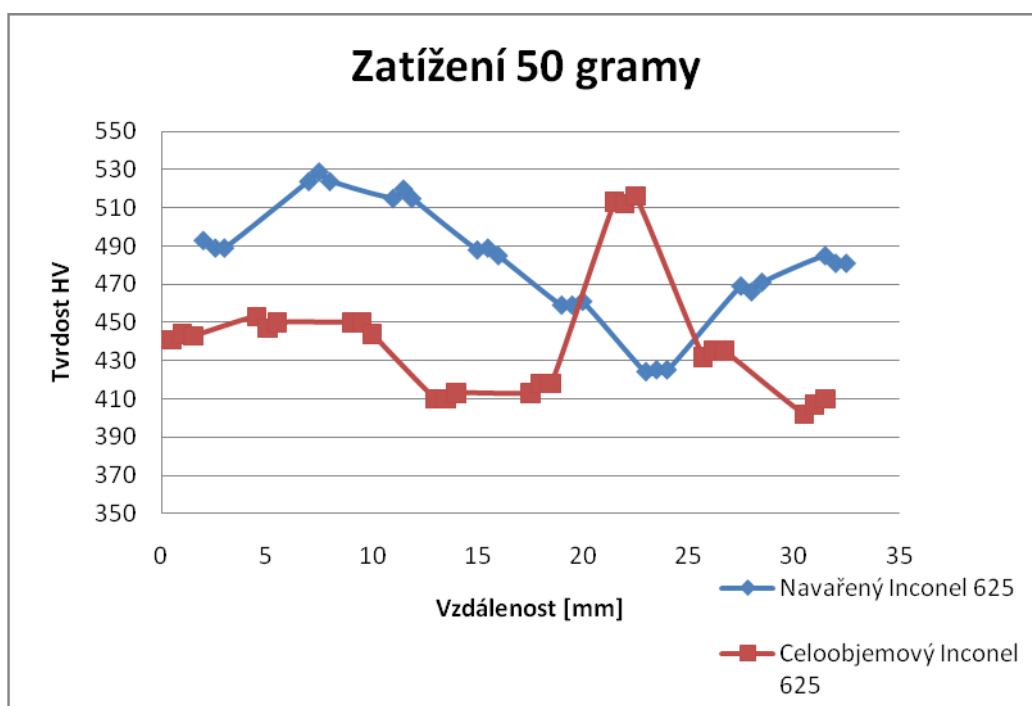
Po dosažení posuvů 0,07 mm začíná docházet ke změnám tvrdosti jednotlivých povrchů materiálů. Tvrdost navařeného Inconelu zůstává konstantní a klesá již velmi pozvolna u jednotlivých posuvů při posuvu 0,1 mm na 492 HV, při 0,15 mm na 485 a při posledním posuvu 0,2 mm klesne na hodnotu 487 HV. U celoobjemového Inconelu dochází k výraznějšímu poklesu tvrdosti při zvyšujících se posuvech pro 0,1 mm na 472 HV, 0,15 mm na 434 HV a při konečném posuvu 0,2 mm klesne tvrdost na 430 HV.

Tento jev potvrzuje, že u navařeného Inconelu již nedochází k výraznému poklesu tvrdosti povrchové vrstvy během opracování při zvyšujících se posuvech. Zatímco u celoobjemového Inconelu dochází při zvyšování posuvu neustále ke snižování tvrdosti

povrchové vrstvy. Rozdíl mezi oběma materiály je nejvyšší u posledního posuvu 0,2 mm a to 55 HV.

### 8.1.2 Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti plochy opracované upichovacím nožem

Porovnání naměřených hodnot v grafu Graf 8.2. Tento graf je složen z grafu Graf 7.6 a Graf 7.12. Tyto grafy znázorňují tvrdost povrchové vrstvy u jednotlivých vzorků.



Graf 8.2 Porovnání tvrdosti HV při zatížení 50 gramy

Z grafu je patrné, že tvrdost při jednotlivých posuvech je různá bez tendence růst nebo klesat. Je zde vidět, že po opracování materiálu upichovacím nožem je povrch u navařeného Inconelu tvrdší o hodnotu pohybující se v rozmezí 30 ÷ 60 HV. Pouze u posuvu 0,1 mm se hodnoty mění. Důvodem je již dříve zmíněná nehomogenita materiálu Inconel.

## **8.2 Shrnutí naměřených hodnot tvrdosti opracovaného povrchu podle Vickerse**

Ze získaných poznatků vyplývá, že při opracování materiálu Inconel 625 stranovým ubíracím nožem se při posuvech do 0,07 mm neprojeví rozdílnost tvrdosti povrchové vrstvy navařeného nebo celoobjemového Inconelu. Rozdíl je patrný až při posuvu od 0,1 mm, kdy tvrdost navařeného Inconelu zůstává přibližně na stejné hodnotě. Zatímco u celoobjemového Inconelu tvrdost nadále klesá se stejnou pravidelností

Při druhém způsobu opracování upichovacím nožem je patrné, že navařený Inconel má při všech posuvech vyšší tvrdost než celoobjemový Inconel a to o hodnoty  $30 \div 60$  HV. Odchylka tvrdosti při posuvu 0,1 mm je způsobena nehomogenitou materiálu Inconel.

## **8.3 Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti povrchu podle Brinella**

Měření tvrdosti základního materiálu podle Brinella bylo u navařeného Inconelu vyšší o 32 HB než u celoobjemového Inconelu.

Rozdílnost tvrdosti navařeného Inconelu a celoobjemového Inconelu je způsobena rozdílným metalurgickým procesem. Potvrzuje se zkušenost získaná ve firmě V-NASS, že navařený materiál má skutečně zhoršenou obrobitelnost vůči celoobjemovému Inconelu.

## **8.4 Vyhodnocení naměřených hodnot drsnosti ploch**

Drsnost povrchu byla měřena pomocí přístroje Mitutoyo SJ400. Měření bylo prováděno z důvodu zjištění, jaký vliv má různé opracování na drsnost povrchu. Jako první bylo provedeno měření drsnosti povrchu na vzorcích s navařeným Inconelem. U vzorků opracovávaného stranovým ubíracím nožem lze z měření zjistit, že drsnost s poklesem posuvu klesá viz. Tab. 7.6.



Při opracování plochy upichovacím nožem se změny drsnosti neprojeví tak výrazně při měnícím se posuvu viz. Tab. 7.5. Naměřená drsnost se projevovala v rozmezí pouze  $0,35 \div 0,60$  Ra u všech posuvů.

Poté bylo provedeno měření celoobjemového Inconelu. Při měření drsnosti po opracování upichovacím nožem byly předpokládány podobné výsledky jako u navařeného vzorku. Ovšem měření ukázalo, že drsnost s klesajícím posuvem klesá viz. Tab. 7.7.

U opracování plochy stranovým ubíracím nožem drsnost klesala společně s klesajícím posuvem viz. Tab. 7.8.

Z těchto výsledků vyplývá, že drsnost opracovaného povrchu klesá společně se snižujícím se posuvem. Tento předpoklad neplatí pouze u navařeného Inconelu, který je opracováván upichovacím nožem, kde dochází ke změně drsnosti povrchu minimálně ( $0,35 \div 0,60$  Ra).

## **8.5 Návrh opracovávání Inconelu na základě zjištěných údajů**

Ze zjištěných údajů vyplývá, že při opracovávání Inconelu nízkými posuvy, které se používají při dokončovací třísce, dochází k výraznému zpevnění povrchové vrstvy. Tento jev je nežádoucí, pokud musí být takto zpevněná povrchová vrstva znovu opracována (obráběna).

Toto nejčastěji nastává při opracování ploch s úzkou tolerancí rozměru, kdy se obsluha stroje několika třískami přibližuje střednímu průměru tolerance. Zvláště u méně zkušených obráběčů je tento postup častý. Toto vede k opakovanému zpevňování povrchové vrstvy. Kromě vyšší spotřeby břitových destiček dochází k zhoršenému povrchu obrábění a zároveň k většímu nebezpečí nedodržení úzké tolerance rozměru.

Na základě výsledku diplomové práce bylo doporučeno rozdělit obráběcí třísky na hrubovací a jednu dokončovací. Toto je podmíněno tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek. Dále pak přesností stroje, garantovanou pravidelnou údržbou a v neposlední řadě proškolenou odbornou obsluhou, včetně programátorů CNC strojů. Firma V-NASS na základě této diplomové práce přijme preventivní opatření, kde zmíněné poznatky využije

## 9 Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnání rozdílných jakostí povrchu pro opracování kovaného materiálu s navařeným materiálem a stanovení jejich příčiny. Navrhnout postup obrábění eliminující tyto rozdíly. Součástí řešení diplomové práce bylo zhotovit srovnatelné vzorky navařeného a kovaného materiálu, tak jako využívá firma V-NASS tyto materiály u svých výroků. Provést kontrolní zkoušky dvou způsobů obrábění. Obrobené plochy vyhodnotit předem stanovenými metodami a ty následně vyhodnotit. Závěrem navrhnout firmě V-NASS nejvhodnější způsob obrábění eliminující rozdílné vlastnosti obou materiálů. Pro porovnání byl vybrán materiál Inconel 625.

Jako hlavní porovnávací parametr byl zvolen zpevňující efekt povrchové vrstvy při obrábění. Tento efekt byl zkoumán pomocí zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse, dále zkouškou porovnání tvrdosti základního materiálu podle Brinella a drsnosti povrchu obráběných ploch. Všechny tyto zkoušky byly prováděny na opracovaných plochách, které byly opracovávány předem navrženými rozdílnými posuvy (0,2 mm, 0,15 mm, 0,10 mm, 0,07 mm, 0,05 mm, 0,03 mm, 0,02 mm a 0,01 mm), ostatní parametry obrábění zůstávaly beze změn. Bylo navrženo opracování stranovým ubíracím nožem a upichovacím nožem s vyměnitelnými břitovými destičkami nejčastěji používanými ve firmě V-NASS.

Při porovnání výsledků tvrdosti povrchové vrstvy podle Vickerse po opracování stranovým ubíracím nožem bylo zjištěno, že dochází k výraznému snížení tvrdosti povrchové vrstvy během opracování při zvyšujících se posuvech. Nejvyšší tvrdost byla naměřena 585 HV při posuvu 0,02 mm, zatímco nejnižší tvrdost měla hodnotu 430 HV u nejnižšího posuvu 0,01 mm.

U porovnání tvrdosti povrchové vrstvy podle Vickerse, při opracování upichovacím nožem bylo opět zjištěno, že navařený Inconel má při všech posuvech vyšší tvrdost povrchové vrstvy oproti kovanému Inconelu a to o hodnoty 30 ÷ 60 HV. Průměrná hodnota tvrdosti u navařeného Inconelu je 482 HV a u kovaného 440 HV.

Měření tvrdosti základního materiálu podle Brinella bylo použito na základě zjištění, že tvrdost povrchové vrstvy po opracování upichovacím nožem byla u navařeného Inconelu

vyšší o  $30 \div 60$  HV. Tato zkouška pouze potvrdila, že navařený Inconel má vyšší tvrdost základního materiálu než Inconel kovaný. Rozdíl v tvrdosti obou materiálů byl 32 HB. Přes stejné chemické složení obou Inconelových vzorků je zřejmé, že navařený materiál získává jiné vlastnosti zhoršující obráběcí proces.

Po provedení měření drsnosti povrchu bylo zjištěno, že drsnost má klesající tendenci společně s klesajícím posuvem. Tento jev neplatí pouze u navařeného Inconelu, který je opracován pomocí upichovacího nože. V tomto případě nedochází k výrazným změnám drsnosti, která zůstává po celou dobu v rozmezí  $0,35 \div 0,60$  Ra.

Z těchto údajů vyplývá, že po opracování Inconelu nízkými posuvy, které jsou používány při dokončovací třísce, dochází k nežádoucímu zpevnění povrchové vrstvy. V důsledku tohoto zpevnění jsou vyšší měrou opotřebovávány soustružnické nože, což vede ke zhoršené kvalitě opracované plochy a k snížené životnosti břitů nástroje. Je doporučeno optimalizovat řezné podmínky u opracování Inconelu použitím více hrubovacích třísek, s jednou dokončovací třískou. Podmínku pro zavedení tohoto opatření, je přesný tuhý stroj. Odladěný CNC program, včetně optimalizace volby řezných nástrojů a v neposlední řadě proškolení operátorů CNC strojů

## Seznam obrázků

Obr. 4.1 Podmořská těžba ropy[1].....	8
Obr. 5.1 Příprava obrobku na navařování .....	13
Obr. 5.2 Obrobek s navařeným Inconelem 625 .....	14
Obr. 5.3 Opracování kovaného Inconelu upichovacím a stranovým ubíracím nožem.....	15
Obr. 5.4 Opracování navařeného Inconelu upichovacím a stranovým ubíracím nožem.....	16
Obr. 6.1 Tvorba třísky u „klasické“ a „HSC technologie“[5] .....	17
Obr. 6.2 Schéma měření tvrdosti podle Vickerse [7] .....	21
Obr. 6.3 Ukázka vtisku při zkoušce tvrdosti podle Vickerse [7].....	22
Obr. 6.4 Schéma měření tvrdosti podle Brinella[8] .....	24
Obr. 7.1 AMH43-Serie Automatický systém pro měření tvrdosti[9].....	27
Obr. 7.2 Měřicí přístroj FOUNDRAX VM-19.....	41
Obr. 7.3 Vpichy po měření tvrdosti podle Brinella .....	42
Obr. 7.4 Přístroj Mitutoyo SJ400 pro měření drsnosti povrchu .....	43

## Seznam tabulek

Tab. 4.1 Chemické složení materiálu Inconel 625[6].....	11
Tab. 5.1 Tabulka navržených posuvů .....	15
Tab. 6.1 Druhy měření tvrdosti podle Vickerse[7].....	21
Tab. 7.1 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů .....	30
Tab. 7.2 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů .....	33
Tab. 7.3 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů .....	36
Tab. 7.4 Tabulka naměřených hodnot při zatížení 50 gramů .....	39
Tab. 7.5 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování upichovacím nožem .....	44
Tab. 7.6 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování stranovým ubíracím nožem ....	44
Tab. 7.7 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování upichovacím nožem .....	45
Tab. 7.8 Tabulka naměřených hodnot drsnosti po opracování stranovým ubíracím nožem ....	45

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1: Výsledky měření tvrdosti podle Vickerse u kovaného Inconelu opracovaného upichovacím nožem

Příloha č. 2: Výsledky měření tvrdosti podle Vickerse u kovaného Inconelu opracovaného stranovým ubíracím nožem

Příloha č. 3: Výsledky měření tvrdosti podle Vickerse u navařeného Inconelu opracovaného upichovacím nožem

Příloha č. 4: Výsledky měření tvrdosti podle Vickerse u navařeného Inconelu opracovaného stranovým ubíracím nožem

Výkres č. 1: Kovaný Inconel

Výkres č. 2: Navařený Inconel

## Seznam použité literatury

- [1] VITÁSEK, Tomáš. *Návrh technologie obrábění navařených strojních součástí*. Ostrava, 2009. 43 s. Bakalářská práce. VŠB-Techická univerzita Ostrava.
- [2] NESLUŠAN, M.; CZÁN, A. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina : Žilinská univerzita v Žilině, 2001. 195 s. ISBN 80-7100-933-4.
- [3] KONDERLA, R. *Možnosti snižování nákladů při výrobě součástí z těžkoobrobitelných materiálů*. Teze disertační práce. Ostrava : VŠB-Technická universita Ostrava, 2010. 31s.
- [4] KONDERLA, R.; MRKVICA, I.; JANOŠ, M.; VITÁSEK, T. *Possibilities of the Machining Nickel Alloys*. In Proceedings of 10th International Scientific Conference New Ways in Manufacturing Technologies. Prešov : TU Košice, FVT with seat in Prešove, 17 – 19th June 2010, p. 155-160. ISBN 978-80-553-0041-0.
- [5] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [6] *Special metals* [online]. 2007 [cit. 2010-11-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>>.
- [7] *Ime.fme.vutbr* [online]. 2008 [cit. 2010-11-23]. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotrvdost/uvod/uvod/uvodstr.htm>>.
- [8] *Zkouška tvrdosti podle Brinella*. In [online]. [s.l.] : [s.n.], 2008 [cit. 2011-05-03]. Dostupné z WWW: <[ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrnosti%20podle%20brinella.doc](http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/zkouska%20tvrnosti%20podle%20brinella.doc)>.
- [9] *Http://www.leco.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-05-03]. LECO. Dostupné z WWW: <[http://www.leco.cz/cz/products/metallography/hardness\\_tester/amh\\_series/amh\\_series.htm](http://www.leco.cz/cz/products/metallography/hardness_tester/amh_series/amh_series.htm)>.
- [10] *Www.mitutoyo.com* [online]. 2007 [cit. 2011-05-03]. Mitutoyo. Dostupné z WWW: <<http://www.mitutoyo.com/pdf/1902SJ400.pdf>>.